

Κεφάλαιο 1

Μοριακά Νέφη και η Ύλη μεταξύ των Αστέρων

Στον μεσοαστρικό χώρο υπάρχει μια τεράστια ποσότητα ύλης υπό τη μορφή αερίου και σκόνης. Το υλικό αυτό είναι η πρωτογενής αιτία της δημιουργίας των αστέρων άρα η έρευνα για τη σύνθεση και τα χαρακτηριστικά της είναι απαραίτητη για την βαθύτερη κατανόηση της πρώιμης δημιουργίας των αστέρων.

ποσοστό στο γαλαξία?

διατύπωση

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η ύλη μεταξύ των αστέρων αποτελείται περίπου κατά 99% από αέριο και κατά 1% από σκόνη με τη συνολική της μάζα στο γαλαξία μας να είναι της τάξης των M_{\odot} ενώ η πυκνότητα της κυμαίνεται από 10^{-4} έως 10^6 σωματίδια ανά cm^3 .

διατύπωση

μάζα αερίου

Μεσοαστρικό Αέριο Το Μεσοαστρικό Αέριο παρατηρείται κυρίως σε μορφή διακριτών συμπυκνώσεων δηλαδή έχουν δομή νεφών ενώ μπορεί να βρίσκεται σε μορφή ατομική, ιονισμένη και μοριακή. Τα συστατικά του αερίου είναι:

- Υδρογόνο (H_2 , H, HI, HII, e^-)
- Ήλιο (HeI, HeII)
- Trace Elements (C, O, Ne, Mg, Fe, κ.α.)
- Μόρια (CO, Cs, κ.α.)

Μετάφραση

με το κυριότερο σε αναλογία να είναι το Υδρογόνο.

αναλογία Υδρογόνου

1.1 Φάσεις και χαρακτηριστικά της Μεσοαστρικής Ύλης

Η Μεσοαστρική Ύλη (ISM) απαντάται σε τρεις φάσεις με διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά: ¹ τη **ψυχρή** που αποτελείται από μοριακό και ατομικό αέ-

¹Για τα χημικά χαρακτηριστικά αναφερόμαστε στη σύνθεση των μορίων και στην αναλογία των στοιχείων. Στα φυσικά χαρακτηριστικά αναφερόμαστε στη πυκνότητα και τη θερμοκρασία της Ύλης

ριο Υδρογόνου και σκόνη, τη **θερμιά** από ατομικό και ιονισμένο αέριο Υδρογόνο και την **υπέρθερμη** από διεγερμένο αέριο από κρουστικά κύματα εκρήξεων supernova.

1.1.1 Ενεργειακή ισορροπία

Η κινητική θερμοκρασία ² της Μεσοαστρικής Ύλης κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών 6 τάξεων μεγέθους όπως παρατηρούμε και από τον πίνακα 1.1. Για να περιγράψουμε και να μοντελοποιήσουμε την ενεργειακή ισορροπία στη Μεσοαστρική Ύλη άρα να εξηγήσουμε και τις παρατηρούμενες θερμοκρασίες θα πρέπει να υπολογίσουμε τις διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης. Η κύρια διαδικασία ψύξης είναι η εκπομπή ακτινοβολίας είτε μέσω αυθόρμητης αποδιέγερσης ή αποδιέγερσης λόγω κρούσης. Ενώ για τη θέρμανση έχουμε μια πληθώρα διαδικασιών θέρμανσης οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 κατηγορίες:

- θέρμανση από πεδία ακτινοβολίας: φωτοηλεκτρική απορρόφηση σε ουδέτερα στοιχεία, φωτοδιάσπαση στα μόρια, φωτοιονισμός.
- θέρμανση μέσω συγκρούσεων: από τυρβώδες ροές, κρουστικά κύματα καταλοίπων supernova και κοσμικής ακτινοβολίας.
- θερμική ανταλλαγή μεταξύ της σκόνης και νεφών αερίου, αλληλεπίδραση ιονισμένου αερίου με μαγνητικά πεδία, βαρυτική κατάρρευση.

1.1.2 Παρατηρήσεις της Μεσοαστρικής Ύλης

Η παρατήρηση και μελέτη της Μεσοαστρικής Ύλης ποικίλει αναλόγως τη φάση στην οποία βρίσκεται.

Παρατήρηση 21.1 cm Η καλύτερη μέχρι σήμερα δυνατή μέθοδος για την παρατήρηση του **Ουδέτερου Υδρογόνου HI** είναι η εκπομπή της γραμμής 21.1 cm στα ραδιοκύματα που οφείλεται στη μετάπτωση αντιστροφής του spin του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου στη βασική κατάσταση του ατόμου του Υδρογόνου. Η ενεργειακή διαφορά των καταστάσεων με συνολικό spin $F = 1$ (**τα spin p^+ και e^- είναι παράλληλα**) και $F = 0$ (**τα spin p^+ και e^- είναι αντιπαράλληλα**) είναι $h\nu = 6 \times 10^{-6} \text{ eV}$ η οποία αντιστοιχεί στη γραμμή των 21 cm. Ο συντελεστής Einstein για την αυθόρμητη εκπομπή είναι $A_{10} \simeq 3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ που αντιστοιχεί σε μια χρονική κλίμακα των 10^7 ετών στην οποία παραμένει ένα διεγερμένο άτομο Υδρογόνου μέχρι να αποδιεγερθεί αυθόρμητα εκπέμποντας το παρατηρούμενο φωτόνιο. Ο πολύ μικρός αυτός ρυθμός εκπομπής αντιπαραβάλλεται εν τέλει από τη τεράστια ποσότητα του ατομικού υδρογόνου έτσι ώστε να είναι

Περιοχές H α

²Το ψυχρό μεσοαστρικό αέριο λόγω της γενικά χαμηλής του πυκνότητας δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Επομένως όταν μιλάμε για θερμοκρασία αναφερόμαστε στη κινητική του θερμοκρασία.[1, p. 28]

διατύπωση

ολοκλήρωση

φάσματα απορρόφησης

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά της μεσοαστρικής ύλης και περιοχές παρατήρησης

Κατηγορία	Κατάσταση Υδρογόνου	T (K)	n (cm^{-3})	Περιοχή Παρατηρήσεων
Μοριακά Νέφη	Μοριακό H_2	10-50	$> 10^3$	Μοριακή εκπομπή - απορρόφηση στο Ράδιο και στο Υπέρυθρο
Ψυχρά Νέφη HI	Ατομικό H	100	30	Γραμμή απορρόφησης 21 cm
Θερμό HI	Ατομικό H	10^3	0.1	Γραμμή εκπομπής 21 cm
Θερμό HII	Ιονισμένο H^+	10^4	10^{-2}	Γραμμή Εκπομπής $H\alpha$
Περιοχές HII	Ιονισμένο H^+	10^4	> 100	Γραμμή Εκπομπής $H\alpha$
Υπέρθερμο Ιονισμένο αέριο	Ιονισμένο H^+	$10^6 - 10^7$	10^{-3}	Εκπομπή ακτινοβολίας X, Απορρόφηση από ιονισμένα μέταλλα

1.2 Μοριακά Νέφη

Οί πιο ενδιαφέρουσες -σχετικά με τη δημιουργία αστέρων- περιοχές του Μεσοαστρικού Υλικού είναι αυτές όπου εμφανίζεται πυκνότερο ($10\text{-}30$ άτομα ανά cm^3) και βρίσκεται στη **ψυχρή φάση** (τυπικές θερμοκρασίες $10 - 50$ K) δηλαδή έχει νεφελώδη μορφή και απαρτίζεται κυρίως από μοριακό και ατομικό Υδρογόνο. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται Μοριακά Νέφη (Molecular Clouds).

διατύπωση

1.2.1 Χαρακτηριστικά των Μοριακών Νεφών

Όπως αναφέραμε γενικότερα στη παράγραφο 1.1.1 η θερμοκρασία ενός νέφους είναι αποτέλεσμα στην ενεργειακής ισορροπίας μεταξύ των μηχανισμών θέρμανσης και ψύξης. Για τα Μοριακά Νέφη συγκεκριμένα η θέρμανση είναι αποτέλεσμα της θερμότητας που παρέχεται από κοντινά άστρα ή μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ η ψύξη επιτυγχάνεται μέσω διαδικασιών απορρόφησης και κρούσης με τα σωματίδια της σκόνης ή του αερίου. Η ενέργεια τελικά αποδίδεται μέσω της εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας.

1.2.1.1 Δημιουργία του Μοριακού Υδρογόνου

Το κυριότερο συστατικό των Μοριακών Νεφών είναι το μοριακό Υδρογόνο (H_2). Όταν δύο άτομα Υδρογόνου ενώνονται και δημιουργούν ένα μόριο H_2 αυτό κερδίζει ενέργεια η οποία δεν μπορεί να αποδοθεί στο περιβάλλον με αποτέλεσμα το μόριο να διασπάται. Αν όμως η διαδικασία αυτή γίνει πάνω σε έναν κόκκο σκόνης, τότε αυτός λειτουργεί καταλυτικά απορροφώντας το πλεόνασμα ενέργειας και το μόριο παραμένει σταθερό. Έτσι πραγματοποιείται μια διαδικασία ανάδρασης όπου τα άτομα Υδρογόνου τροφοδοτούν περιοχές μεγάλης πυκνότητας με H_2 αυξάνοντας έτσι κι άλλο τη τοπική πυκνότητα. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται περιοχές μεγάλης πυκνότητας όπου λαμβάνει χώρα και η δημιουργία των αστέρων.

1.2.1.2 Μορφολογία Μοριακών Νεφών

Η παραπάνω διαδικασία δίνει στα μοριακά νέφη μια ιεραρχικά δομημένη μορφή όπου οι πυκνότερες περιοχές έχουν μικρότερη κλίμακα μήκους (clumpiness). Εκτός από τη clumpiness μορφολογία -που φαίνεται και από το πίνακα 1.2, παρατηρούμε και νηματώδεις (filaments) δομές συμπυκνώσεων.

1.3 Παρατηρήσεις των Μοριακών Νεφών

Παρά τη "κυριαρχία" του μοριακού υδρογόνου στα Μοριακά Νέφη είναι αδύνατον να το παρατηρήσουμε καθώς η ενεργειακή διαφορά ακόμα και των χαμηλότερων διεγερμένων από τη βασική στάθμη είναι πολύ μεγάλη. Έτσι στις χαμηλές θερμοκρασίες των Μοριακών Νεφών, η μόνη δυνατότητα να παρατηρήσουμε άμεσα το H_2 είναι μέσω γραμμών απορρόφησης από πηγές στο υπόβαθρο.

1.3.1 Ενεργειακές μεταβάσεις του H_2

Το H_2 είναι ένα πλήρως συμμετρικό μόριο άρα δεν έχει μόνιμη διπολική ροπή. Άρα αφού οι μεταβάσεις του ηλεκτρικού διπόλου είναι απαγορευμένες οι επόμενες είναι οι τετραπολικές. Η ενέργεια περιστροφής είναι $E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2I_{H_2}} J(J+1)$ όπου J ο περιστροφικός κβαντικός αριθμός και $I_{H_2} = 5 \times 10^{-48} \text{ kg m}^2$ η ροπή αδράνειας του H_2 . Για τις τετραπολικές μεταβάσεις έχουμε ότι $\Delta J = 0, \pm 2$, άρα για το H_2 αυτό μπορεί να βρίσκεται σε δύο μορφές, αυτή του παρά- H_2 όπου είναι κατειλημμένες μόνο οι καταστάσεις με $J = 0, 2, 4, 6, \dots$ και η όρθο- H_2 όπου είναι κατειλημμένες μόνο οι καταστάσεις με $J = 1, 2, 5, \dots$. Άρα η χαμηλότερη ενεργειακή διαφορά από τη βασική κατάσταση ($J = 0$) είναι η

$$\Delta E = E(J=2) - E(J=0) \simeq 7.5 \times 10^{-21} \text{ J}$$

η οποία αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 510 K. Η μετάβαση έχει συντελεστή Einstein $A_{20} = 3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ και παράγει ένα φωτόνιο μήκους κύματος 28.2 μm στο υπέρυθρο.

Αν εργαστούμε αντίστοιχα για τις ταλαντωτικές μεταβάσεις, βρίσκουμε ότι αυτές αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες χιλιάδων βαθμών κέλβιν. Για τέτοιες θερμοκρασίες ένα διεγερμένο μόριο H_2 φτάνει στη βασική του κατάσταση με συνδυασμό ταλαντωτικών και περιστροφικών μεταβάσεων. Οι εκπομπές αυτές είναι χαρακτηριστικές στα μέτωπα κυμάτων κρούσης όπου το H_2 θερμαίνεται σε χιλιάδες βαθμούς κέλβιν.

1.3.2 Παρατηρήσεις στο CO

Εφόσον το H_2 είναι δύσκολο να το παρατηρήσουμε χρησιμοποιούμε το Μονοξείδιο του Άνθρακα CO σαν tracer του μοριακού αερίου. Το CO είναι το δεύτερο σε αναλογία μόριο στο Σύμπαν (μετά το H_2) και έχει μόνιμη διπολική ροπή άρα έχουμε περιστροφικές ενεργειακές μεταβάσεις με $\Delta J = \pm 1$ το οποίο του επιτρέπει να εκπέμπει σημαντικά στο ραδιοφωνικό φάσμα. Σε αντιστοιχία με τη διαδικασία

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά και διαφορετικοί τύποι Μοριακών Νεφών

Κατηγορία	Μέση ακτίνα (pc)	T (K)	$n(H_2)$ (cm^{-3})	Μάζα (M_\odot)
Γιγαντιαίο Μοριακό Νέφος	20	15	100	10^5
Μοριακό Νέφος	5	10	300	10^4
clump	2	10	10^3	10^3
Πυρήνας Νέφους	0.08	10	10^5	10

που κάναμε στη παράγραφο 1.3 βρίσκουμε για το CO για τη χαμηλότερη μετάβαση $J = 1 \rightarrow 0$ $\Delta E = 4.8 \times 10^{-4} eV$ το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 5.5 K. Η μετάβαση αυτή αποδίδει ένα ραδιοφωνικό φωτόνιο στα 2.6 mm και ο συντελεστής Einstein είναι $_{10} = 7.5 \times 10^{-8} s^{-1}$. Ο κύριος μηχανισμός διέγερσης ενός μορίου CO είναι μέσω της σύγκρουσης του με ένα μόριο

Βιβλιογραφία

- [1] Lyman Spitzer. *Physical processes in the interstellar medium*. New York: Wiley, 1998. ISBN: 0471293350 9780471293354.